

# Исследование вариаций электрического поля в приземной атмосфере с учётом её температурной стратификации

ПЕТРОВА Г. Г.<sup>1</sup>, ПАНЧИШКИНА И. Н.<sup>1</sup>, ПЕТРОВ А. И.<sup>1</sup>, ЧХЕТИАНИ О. Г.<sup>2</sup>,  
МОИСЕЕВ П. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН г. Москва, Россия

email: georgpu@rambler.ru ochkheti@rssi.ru

Разработанные на данный момент модели электродного слоя атмосферы дают определенное понимание электрических процессов, происходящих в приземной атмосфере, но нуждаются в экспериментальном подтверждении теоретических результатов, исследовании границ применимости моделей, выделении типов физических условий, когда может быть применима та или иная модель. Сообразно представлениям классического электродного эффекта, вблизи земной поверхности формируется положительный объёмный заряд. Вследствие этого поле в электродном слое увеличивается по мере приближения к земной поверхности. В то же время, электродный эффект не единственный источник объёмных зарядов в приземном слое. Для объёмного заряда лёгких ионов на основании уравнения Пуассона можно записать:

$$\rho_{\text{л.и.}} = \frac{\varepsilon_0}{\lambda} \nabla \cdot \vec{j}_\lambda - \frac{\varepsilon_0}{\lambda} \vec{E} \cdot \nabla \lambda \quad (1)$$

Здесь  $\lambda$  – удельная электропроводность атмосферы,  $\vec{E}$  – вектор напряжённости электрического поля,  $\vec{j}_\lambda$  – плотность тока проводимости,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная.

Первый член в уравнении (1), обусловленный дивергенцией тока проводимости в атмосфере вблизи её границы с земной поверхностью, относится к электродному эффекту поверхности земли. Второй член уравнения (1) описывает процессы формирования объёмного заряда вследствие прохождения тока проводимости в атмосфере через слои с градиентом её электропроводности. В проекции на вертикальную ось:

$$\rho_{\text{л.и.}} = \frac{\varepsilon_0}{\lambda} \frac{\partial j_z}{\partial z} - \frac{\varepsilon_0}{\lambda} E_z \frac{\partial \lambda}{\partial z} \quad (2)$$

Для горизонтально-однородной атмосферы в случае ненарушенного поля, когда вектор напряжённости направлен вниз к земле, проекция градиента потенциала на вертикальную ось, направленную вверх, отрицательна:  $E_z < 0$ . Тогда при уменьшении электропроводности с высотой её градиент также будет отрицателен, и минус перед вторым членом уравнения (2) сохранится, что свидетельствует об отрицательном знаке формирующегося в соответствующем слое объёмного заряда.

В природе отрицательный градиент электропроводности наблюдается, если почва заметно эманурует при ослабленном турбулентном перемешивании приземного слоя [1]. Это способствует накоплению вблизи земли радиоактивных эманаций (прежде всего, радона-222 с периодом полураспада 3,8 суток) и, соответственно, усилению ионизации воздуха у земной поверхности. В реальности оба процесса протекают одновременно, и результат – плотность объёмного заряда лёгких ионов – будет зависеть от соотношения их продуктивности на каждом уровне. При взаимодействии лёгких ионов с частицами аэрозоля образуются тяжёлые ионы, время жизни которых исчисляется часами в отличие от нескольких минут для лёгких ионов. Слои заряженного аэрозоля могут длительное время присутствовать в атмосфере, определяя величину и вертикальный профиль электрического поля.

Таблица 1. Средние характеристики атмосферы для разных параметров стратификации  $m$ .

Величина	Высота, м	Устойчивая $m < 0,7$		Неустойчивая $m > 1,3$	
Температура воздуха, °С	2,0	24,1	4,6	31,6	5,0
Градиент температуры, °С/м	0,5-2,0	1,2	0,9	-0,8	0,3
Скорость ветра, м/с	0,5	0,8	0,4	2,0	0,4
	2,0	1,2	0,6	2,5	0,5
Относительная влажность, %	2,0	55	19	34	16
Коэффициент турбулентности, $m^2/c$	0,5-2,0	0,01	0,01	0,10	0,02
Объёмная активность радона, Бк/м <sup>3</sup>	0,05	28	13	11	5
Концентрация аэрозолей $> 0,3 \mu$ , $10^8 m^{-3}$	1,0	0,11	0,04	0,09	0,03
<i>Число профилей</i>		28		25	

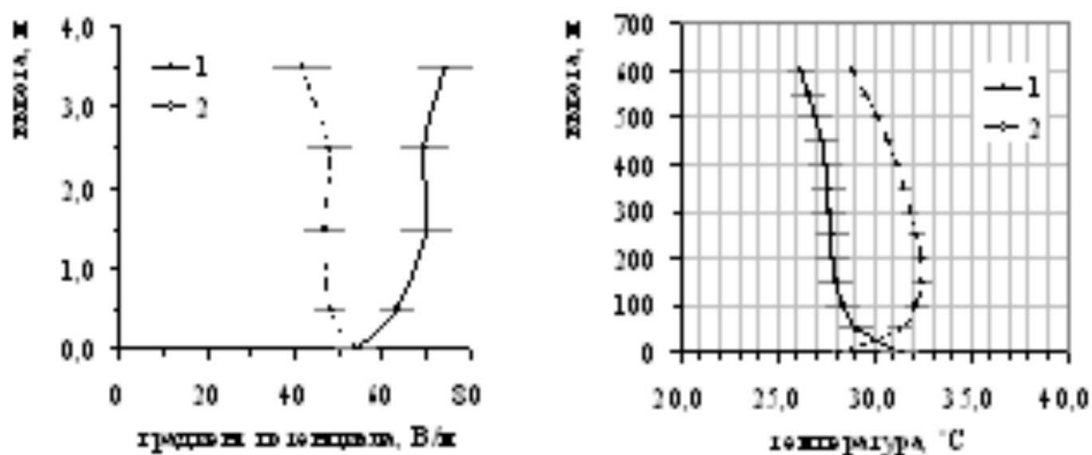


Рис. 1. Результаты измерений в августе 2014 года в Цимлянске при неустойчивой (1) и устойчивой (2) стратификации приземной атмосферы: а – вертикальные профили градиента электрического потенциала; б – кривые температурной стратификации (МТП5). (Планками показаны значения стандартной погрешности.)

В работе анализируются результаты атмосферно-электрических измерений лаборатории геофизических исследований физического факультета Южного федерального университета (ЮФУ) в августе 2014 года в период совместной экспедиции с Институтом физики атмосферы им. А.М.Обухова (ИФА РАН) на Цимлянкой научной станции ИФА, а также ряда экспедиций ЮФУ предыдущего периода, главным образом, в пунктах Капшарского района Ростовской области. Обсуждаемые данные получены одним и тем же измерительно-вычислительным комплексом [2], который с 2012 года пополнился счётчиком аэрозольных частиц АЗ-10. Счётчик предназначен для измерения счетной концентрации аэрозольных частиц с диаметрами от 0,3 до 10 мкм в шести диапазонах: 0,3-0,4; 0,4-0,5; 0,5-1; 1-2; 2-5; более 5. Часть рассматриваемых в работе характеристик измерялась непосредственно традиционными для физики атмосферы методами и хорошо известными приборами. Измерения велись круглосуточно в течение примерно 10 дней. Некоторые параметры получены расчётным путём по общеизвестным формулам и на основании общепринятых подходов [2]. Градиент потенциала на уровне земли измерялся датчиком “Поле-2” системы ГГО им. А.И.Воейкова. С помощью радиоактивных коллекторов на высотах 1, 2, 3 и 4 метра регистрировались электрические потенциалы, что позволяло рассчитывать среднее для слоя значение градиента потенциала через разность потенциалов и расстояние между коллекторами.

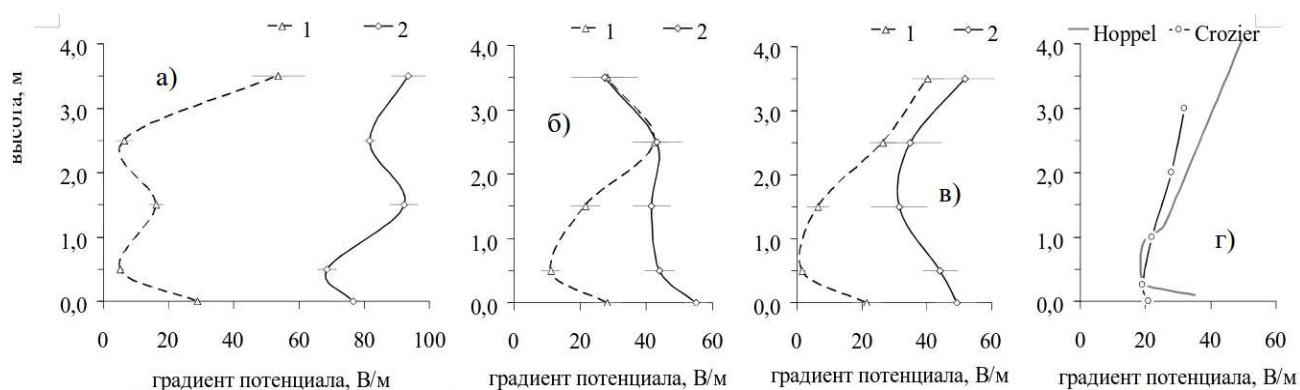


Рис. 2. Вертикальные профили градиента электрического потенциала: а, б, в, – при устойчивой стратификации атмосферы в Федоровке (1) Капшарского района и Цимлянске (2), Ростовская область; г – экспериментальная кривая Crozier [4] для безветренных ночей и расчетный профиль Норрел [5] для нетурбулентного электродного эффекта. (Планками показаны значения стандартной погрешности.)

На рисунке 1а представлены вертикальные профили градиента электрического потенциала, осреднённые для неустойчивой (1) и устойчивой (2) стратификации приземного слоя. Параметр стратификации определялся по известному методу Л.Р.Орленко на основании результатов измерения скорости ветра и температуры воздуха на высотах 0,5 и 2 метра. На рисунке 1 б показаны профили температуры атмосферы до высоты 600 м, осреднённые для этих же групп замеров. Профили получены с помощью температурного профилемера МТП-5, установленного ИФА на измерительном полигоне Цимлянской научной станции на период экспедиционных измерений.

В таблице 1 даны характеристики атмосферы, осреднённые для часов с устойчивой и неустойчивой стратификацией приземного слоя.

По профилям градиента потенциала на рис. 1 вблизи земной поверхности обнаруживаются слои объёмного заряда разных знаков. В соответствии с уравнением Пуассона уменьшение поля по высоте происходит в слоях атмосферы с положительным объёмным зарядом, рост – в отрицательно заряженных слоях.

По наблюдениям при неустойчивой стратификации чаще наблюдаются профили с отрицательным объемным зарядом в нижней части слоя. Он связан, по-видимому, с подъемом отрицательно наэлектризованной пыли ветром с сухой земной поверхности. Аналогичные результаты получены Israelsson [3], наблюдавшим отрицательный объемный заряд при работе сельскохозяйственных машин возле площадки наблюдений.

В 80 % случаев при устойчивой стратификации в период наблюдений в Цимлянске имели место профили с положительным объемным зарядом непосредственно вблизи поверхности земли, о чём свидетельствует уменьшение поля с высотой в нижней части профиля. На рисунке 2 (а, б, в) сплошными линиями представлены средние профили разных типов, наблюдавшихся в числе упомянутых 80 % в Цимлянске. Пунктиром показаны аналогичные профили, полученные в Федоровке Кашарского района. В Федоровке таких профилей в этих условиях было 92 %. На рисунке 2 г для сравнения показан известный экспериментальный профиль Crozier [4] для безветренных ночей и расчётный профиль Норре [5] для нетурбулентного электродного эффекта. Из рисунка видно, что выше положительного заряда во всех случаях поле начинает расти с высотой, что свидетельствует о наличии на этих уровнях отрицательного объемного заряда. Его происхождение связано, по-видимому, с отрицательным градиентом электропроводности, что обсуждалось выше.

При рассмотрении вертикальных профилей поля, полученных при устойчивой стратификации, обращает на себя внимание тот факт, что в Федоровке в 4-метровом слое вертикальный профиль поля, будучи изрезанным, в целом наклонён вправо. Это свидетельствует о преимущественном росте поля с высотой в пределах этого слоя и, соответственно, преимущественном отрицательном объемном заряде в этом слое. Поле на уровне земли под отрицательно заряженными слоями атмосферы оказывается в этих условиях существенно сниженным. Наклон профилей в Цимлянске представляется менее определённым, и значения поля на уровне земли в этом пункте заметно выше, чем в Федоровке. На формирование заряженных структур в нижних десятках и сотнях метров атмосферы указывают авторы целого ряда работ, в частности, [6].

На основании уравнения Пуассона по данным о вертикальном распределении поля сделана оценка плотности объемного заряда, средней по всему 4-метровому слою. Оказалось, что большие отрицательные значения плотности заряда коррелируют с относительно высоким содержанием аэрозолей в приземной атмосфере (Рис. 3 а).

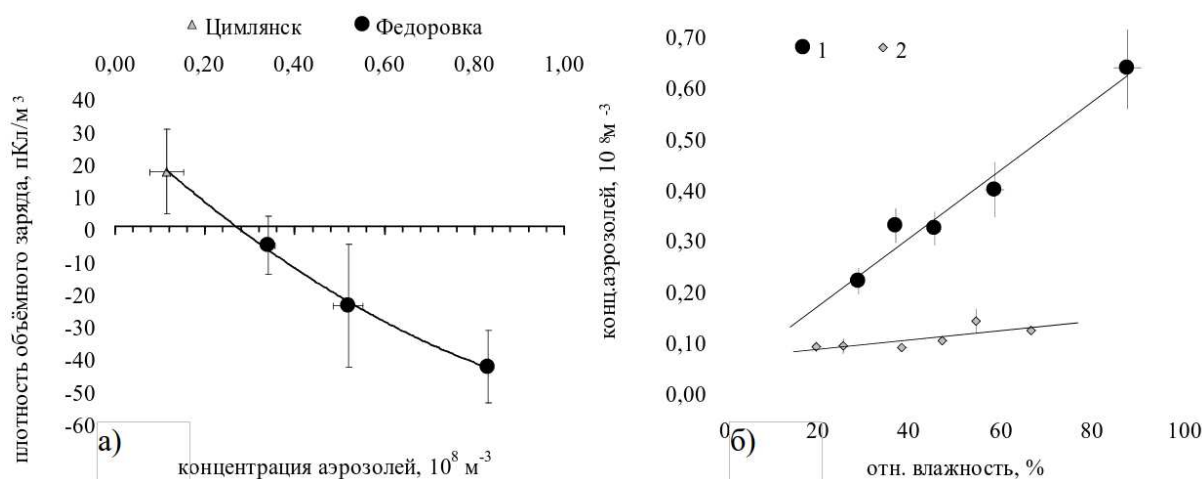


Рис. 3. Ряды регрессии: а) плотности объемного заряда по концентрации аэрозолей; б) концентрации аэрозолей по влажности воздуха в Федоровке (1) и Цимлянске (2).

В свою очередь обнаружено, что имеется тенденция к росту концентрации аэрозолей в обоих пунктах с увеличением влажности (Рис. 3 б).

Можно предположить, что важнейшим механизмом образования заряженных слоёв в приземной атмосфере является избирательная адсорбция аэрозолями разных по знаку зарядов лёгких ионов. Смирнов [7] отмечает, что обнаруженная им при повышении относительной влажности воздуха в адиабатической камере избирательная селекция аэрозольных частиц по отношению к легким ионам разных знаков способствует формированию объёмных зарядов, что приводит к появлению неоднородных электрических полей. Важную роль при этом играет обводнение аэрозоля: значительные отрицательные объёмные заряды, появляющиеся на нерастворимых гигроскопических ядрах при росте влажности с 40 до 70%, Смирнов объясняет структурированием поверхностных плёнок воды, которые проявляют сродство к отрицательным легким ионам. По данным Смирнова, знак заряда зависит от химического состава гигроскопических ядер. Возможно, различия свойств аэрозоля определили наблюдаемые особенности профилей электрического поля в двух пунктах наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант 16-05-00930 А.

#### Литература

1. Petrov A.I., Petrova G.G., Panchishkina I.N. Profiles of polar conductivities and of radon-222 concentration in the atmosphere by stable and labile stratification of surface layer // *Atmospheric Research* (Elsevier). – 2009.-V.91. – P.206-214.
2. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В., Петров Н.А. Измерительный комплекс для исследования электричества приземного слоя атмосферы // *Изв.высших учебных заведений, Сев.- Кав. рег., Естест. Науки.* – 2010. - №3. - С. 47-52
3. Israelsson S. Measurements of surface-air space charges carried by dry wind-driven dust. *J.Atmosph.Terr.Phys.*, 1994. 56 (12), 1551-1556.
4. Crozier W.D. Atmospheric electrical profiles below three meters // *J.Geoph.Res.* 1965. 70. P.2785-2792.
5. Hoppel W.A., 1969. Electrode effect: comparison of theory and measurement, in: S.C.Coroniti and J.Hughes, *Planetary Electrodynamics*, 2. Gordon and Breach Science Publishers, New-York, pp.167-181.
6. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Shikhova N.M. Space charge and aroelectric flows in the exchange layer: An experimental and numerical study // *Atmospheric Research*, 135–136 (2014). Pp.244–254
7. Смирнов В.В. Электризация аэрозоля, обводняющегося в биполярно ионизированном воздухе // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46. № 3. С. 321-331.